

ПРЕПРИНТ



А.А. ИОНИН, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, И.В. КОЧЕТОВ, А.П. НАПАРТОВИЧ, О.А. РУЛЕВ, Л.В. СЕЛЕЗНЕВ, Д.В. СИНИЦЫН

ГЕНЕРАТОР СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА НА ОСНОВЕ ЩЕЛЕВОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА С ПОПЕРЕЧНЫМ ПОТОКОМ ГАЗА ДЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО КИСЛОРОД-ЙОДНОГО ЛАЗЕРА

SINGLET DELTA OXYGEN GENERATOR WITH A SLAB TRANSVERSE GAS FLOW RADIO FREQUENCY DISCHARGE FOR ELECTRIC DISCHARGE OXYGEN-IODINE LASER

A.A.Ionin, Yu.M.Klimachev, O.A.Rulev, D.V.Sinitsyn, L.V.Seleznev P.N.Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences

I.V.Kochetov, A.P.Napartovich

State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research

ABSTRACT

Experimental facility was developed for the study of the processes of singlet delta oxygen $O_2(a^1 \Delta_g)$ (SDO) production and relaxation in subsonic gas flow excited with transverse slab RF discharge. The electric discharge chamber of the facility was equipped with gas flow duct including multi-path cryogenic heat exchanger, dielectric slab channel, and slab electrode system incorporated in the channel for RF discharge ignition. Experiments on SDO production in transverse gas flow slab RF discharge were carried out at oxygen pressure up to 30 Torr. SDO production depending on gas mixture content, gas pressure, gas flow rate, low-frequency modulation of RF power and RF discharge power was studied. It was shown that SDO yield increased with gas pressure decrease, gas flow deceleration and helium dilution of oxygen at the same input power. It was demonstrated that CW RF discharge is more efficient for SDO production at the same averaged input power of RF discharge. Theoretical model was formulated for electric discharge SDO generator for oxygen-iodine laser with selfconsistent description of electron and chemical kinetics taking into account the realistic electric circuit. The model developed was modified to explore pulse-periodic mode of operation of RF discharge with gas flow. The plug flow approximation was adopted where gas mixture components evolution along the flow was considered as time evolution. Numerical simulations demonstrated that the SDO yield and its production efficiency slightly depend on pulse repetition rate of the RF discharge. They both are slightly lower than values predicted for CW mode of RF discharge operation at the power equal to the average power of pulse-periodic regime.

Keywords: singlet delta oxygen, RF discharge, slab discharge, gas flow, pulseperiodic mode, kinetic model.

ГЕНЕРАТОР СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА НА ОСНОВЕ ЩЕЛЕВОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА С ПОПЕРЕЧНЫМ ПОТОКОМ ГАЗА ДЛЯ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО КИСЛОРОД-ЙОДНОГО ЛАЗЕРА

А.А.Ионин, Ю.М.Климачев, О.А.Рулев, Д.В.Синицын, Л.В.Селезнев Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской Академии Наук

И.В.Кочетов, А.П.Напартович

Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований

АННОТАЦИЯ

Создана экспериментальная установка для исследования процессов образования и релаксации синглетного кислорода $O_2(a^1\Delta_g)$ (СК) в дозвуковом возбуждаемом поперечным потоке газа. щелевым ВЧ разрядом. Электроразрядная камера установки была оборудована газовым трактом, включающим в себя криогенный теплообменник, диэлектрический щелевой канал и встроенную в этот канал электродную систему для организации ВЧ разряда. Проведены эксперименты по наработке СК в поперечном по отношению к газовому потоку щелевом ВЧ разряде при давлении кислорода до 30 Торр. В экспериментах исследовалось влияние на наработку СК таких параметров, как давление и состав газовой смеси, скорость потока газа, частота модуляции (низкочастотная) ВЧ мощности и мощность, вкладываемая в ВЧ разряд. Показано, что при одинаковой вкладываемой мощности выход СК увеличивается с уменьшением давления, уменьшением скорости потока газа и при разбавлении кислорода гелием. Сформулирована численная модель СК электроразрядного генератора для кислород-йодного лазера С самосогласованным описанием электронной и химической кинетики и учётом разрядной Эта кинетическая модель была модернизирована цепи. ДЛЯ исследования импульсно-периодического газопроточного ВЧ разряда. При моделировании использовано приближение газовой пробки - эволюция компонент плазмы при движении по каналу рассчитывалась как их эволюция во времени. Экспериментально и теоретически продемонстрировано, что при одинаковой средней мощности, вкладываемой в ВЧ разряд, выход СК и эффективность его образования слабо зависят от частоты повторения ВЧ импульсов, а наиболее эффективно СК нарабатывается в непрерывном ВЧ разряде.

Ключевые слова: синглетный кислород, ВЧ разряд, щелевой разряд, газовый поток, импульсно-периодический режим, кинетическая модель

1. ВВЕДЕНИЕ

Впервые положительный коэффициент усиления и генерация В электроразрядном кислород-йодном лазере были получены при возбуждении кислородсодержащей газовой смеси и наработке синглетного кислорода $O_2(a^1\Delta_a)$ (СК) в высокочастотном (ВЧ) разряде с последующим смешением СК с йодом и охлаждением лазерной смеси в сверхзвуковом потоке (Carroll, 2004; 2005). Охлаждение газовой смеси до криогенных температур позволяет достичь положительного коэффициента усиления при существенно меньшем значении выхода СК Y = $[O_2(a^1\Delta_g)]/[O_2(X^3\Sigma_g^-)]+[O_2(a^1\Delta_g)], Y_{nop}\sim 1\%$ при T = 100 К. Для сравнения Y_{пор} ~15% при T = 300 К. Подробный обзор, посвященный физике и технике наработки СК в электрическом разряде, в т.ч. в ВЧ разряде см. в (Ionin, 2007). В статьях (Carroll, 2004; 2005) и последующих работах как этих, так и др. авторов (см., например, (Benavides, 2008; Carroll, 2008; Zimmerman, 2008a,b; Braginsky, 2006;2007;2008) наработка СК осуществлялась ВЧ разрядом в электроразрядных трубках относительно большого диаметра с продольным по отношению к оси трубки потоком газа. Недостатками такой геометрии являются: относительно низкие давления газа, при котором возможно горение ВЧ разряда; малая роль диффузионного охлаждения газа, а значит существенное повышение температуры газовой смеси после зоны разряда; малый поперечный размер зоны генерации (~ 5 см), что при малом значении коэффициента слабого сигнала (~ $1.7 \ 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ - лучший результат на сегодня (*Carroll*, 2008; *Zimmerman*, 2008а)) влечет за собой применение лазерных зеркал с чрезвычайно высоким коэффициентом отражения ~ 99,99% и выше, и, как следствие, рост бесполезных оптических потерь, связанных с рассеянием и дифракцией.

Хорошо известно, что щелевой (планарный) электрический разряд устойчив при больших давлениях и позволяет эффективно охлаждать возбужденный газ без его прокачки за счет диффузионного охлаждения. Эти преимущества щелевого разряда эффективно используются при создании щелевых газовых лазеров (см., например, (*Hall, 1995*), в т.ч. с криогенным охлаждением без применения сверхзвукового потока (*Ionin, 2009a*). Ранее (*Ionin, 2006a,b*) экспериментально и теоретически исследовалась кинетика щелевого ВЧ разряда и его послесвечения в газовых смесях, содержащих кислород. Основные результаты этих исследований были получены на экспериментальной установке, работающей в статических условиях, т.е. без потока газа, что ограничивает применимость этих результатов для создания и оптимизации параметров реальной электроразрядной системы обеспечивающей как эффективную наработку СК, так и его последующее смешение с потоком йода. Теоретическая работа, проведенная в (*Ionin, 2006a*), была посвящёна созданию полной кинетической модели процессов, определяющих наработку СК в различных разрядах. Созданная модель была протестирована путём сравнения расчетных данных с результатами экспериментов (*Ionin, 2006b*).

Целью настоящей работы являлось экспериментальное и теоретическое исследование генератора СК на основе щелевого ВЧ разряда с поперечным по отношению к относительно длинным электродам потоком газа. Была создана новая экспериментальная установка с щелевым разрядом и дозвуковым потоком газа, в которой предусмотрена возможность предохлаждения (до разряда) газовой смеси и охлаждения электродов. На этой установке исследовано влияние различных экспериментальных параметров на наработку СК в поперечном ВЧ последующую транспортировку. Ранее И его разработанная разряде кинетическая модель была расширена путем включения в нее газодинамических эффектов в газовом потоке, содержащем СК.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА.

Одним из перспективных разрядов для получения СК является емкостной ВЧ разряд щелевого типа, с прокачкой газовой смеси. Кроме получения концентрации СК, необходимой ОН позволяет эффективно охлаждать Импульсновозбуждаемый разрядом газ через стенки электродов. периодический режим работы ВЧ разряда в кислороде предоставляет новые возможности для управления генерацией СК. В этом случае порция газа, пролетающая через зону разряда, испытывает повторяющееся воздействие разряда. Число воздействующих импульсов зависит от частоты повторения, а средняя мощность определяется амплитудой мощности разряда и скважностью ВЧ импульсов.

Для проведения экспериментов по исследованию процессов наработки СК в щелевом поперечном ВЧ разряде в дозвуковом потоке газа была проведена модификация разрядной камеры, использовавшейся ранее в импульсном быстропроточном электроионизационном СО лазере (**Рис.1** и **2**).

5



Рис.1.

Импульсный электроионизационный быстропроточный СО лазер (*Bohn, 2006*)

Рис.2. Модифицированная разрядная камера.



Доработка разрядной камеры проводилась в соответствие со схемой, упрощенный вид которой представлен на **Рис.3**.



Рис.3. Схема электроразрядной камеры.

Внутри камеры были оборудованы: газовый тракт, включающий в себя многопроходный криогенный теплообменник (**Puc.4a**) для предварительного охлаждения газа до низких (~100-120 K) температур; диэлектрический щелевой канал (**Puc.46**) для формирования потока газа сечением ~3х300 мм² и встроенная в этот канал непосредственно за теплообменником электродная система (**Puc.4b**) для организации ВЧ разряда с возможностью дополнительного охлаждения электродов.







Рис.4. Составные части газового тракта внутри разрядной камеры.

- а теплообменник,
- б диэлектрический щелевой канал,
- в электродная система ВЧ разряда.

Для обеспечения стационарной скорости прокачки газовой смеси (~40 м/с) через ВЧ разрядный канал, с одной стороны к камере с помощью двух трубопроводов были подключены вакуумные насосы с суммарной скоростью откачки ~40 л/с при давлении до ~50 Торр. С противоположной стороны газового тракта к камере была подсоединена магистраль от системы приготовления и напуска рабочей газовой смеси.



Рис.5.

Оптические окна и дополнительные вакуумные и электрические вводы на боковых стенках разрядной камеры.



Рис.6. ВЧ генераторы: RFPS-500-AM (81 МГц, 620 Вт) (а), Dressler Cesar-6010 (60 МГц, 1000 Вт) (б).

Модернизации были также подвергнуты боковые и верхняя крышки камеры. На боковых крышках были оборудованы смотровые окна (**Puc.5**), через которые проводилось наблюдение люминесценции СК в различных точках газового тракта вниз по потоку от зоны ВЧ разряда, а также дополнительные вакуумные и электрические вводы для систем диагностики и управления.

На верхней крышке были реализованы теплоизолированные вводы для подачи жидкого азота к теплообменнику и его дренажа и электроизолированные вводы для подачи ВЧ напряжения на электродную систему от ВЧ генератора. Все части установки (теплообменник, диэлектрический щелевой канал, ВЧ разрядная электродная система, формирующие газовый поток стеклянные боковые пластины) были соединены и протестированы на совместное функционирование. В экспериментах использовались два ВЧ генератора: RFPS-500AM (81 МГц) и Cesar 6010 (60 мГц) (**Рис.6**) с максимальной выходной мощностью 620 Вт и 1 кВт, соответственно.

Первые эксперименты по наработке СК в ВЧ разряде с поперечным протоком газа выполнялись для чистого кислорода с охлаждением электродной системы проточной водой комнатной температуры (без криогенного предохлаждения газа). Схема регистрации люминесценции СК использованная в экспериментах, представлена на **Рис.7**.



Рис.7.

Схема регистрации люминесценции СК в поперечном потоке газа, возбуждаемом импульсно-периодическим ВЧ разрядом.

3. ЭКСПЕРИМЕНТ (ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ РЕЖИМ).

Первая серия экспериментов была выполнена с чистым кислородом при давлении 12 Торр, прокачиваемым через разрядную область с очень небольшой скоростью (вблизи минимальной неконтролируемой величины). ВЧ генератор (рабочая частота 81 МГц) работал на уровне мощности 620 Вт, которая была промодулирована низкочастотной (100 Гц) огибающей с длительностью импульсов от 0.2 мс до 1 мс. В этих экспериментах для наблюдения люминесценции СК использовался путь №1 (см. **Рис.7**). Для этих условий временное поведение интенсивности люминесценции СК в зависимости от длительности импульсов ВЧ мощности представлено на **Рис.8**.



Рис.8. Интенсивность люминесценции СК (верхний сигнал) и импульсы ВЧ возбуждения (нижний сигнал, инвертирован). Чистый О₂, давление **12 Торр**. Путь регистрации №1. Длительность импульсов ВЧ возбуждения - 0.2 мс (а), 0.4 мс (б), 0.6 мс (в), и 1.0 мс (г). Развертка 2.5 мс/дел.



Рис.9. Интенсивность люминесценции СК (верхний сигнал) и импульсы ВЧ возбуждения (нижний сигнал, инвертирован). Чистый О₂, давление **25 Тор**. Путь регистрации №1. Длительность импульсов ВЧ возбуждения - 0.2 мс (а), 0.4 мс (б), 0.6 мс (в), and 1.0 мс (г). Развертка 2.5 мс/дел.

Необходимо отметить, что нулевой уровень для верхних сигналов на **Рис.8** (и на всех последующих осциллограммах) совпадает с горизонтальными участками нижних сигналов. Таким образом, остаточную (от предыдущего импульса возбуждения) концентрацию СК можно идентифицировать по сигналу, непосредственно предшествующему следующему импульсу ВЧ возбуждения (**Рис.8**г). Аналогичные измерения были выполнены для потока чистого кислорода при давлении 25 Торр (**Рис.9**). Характеристики ВЧ разряда и газового потока были такими же, как и в предыдущей серии экспериментов.

Из Рис.8 и 9 видно, что амплитуда сигнала люминесценции СК становится больше для больших давлений возбуждаемого газа. Одновременно, время жизни СК уменьшается примерно вдвое (видно из сравнения полуширин импульсов люминесценции СК на соответствующих осциллограммах Рис.8 и 9). Более того, из этих рисунков видно, что чем больше энергия, вложенная в ВЧ разряд, тем больше выход СК, который примерно линейно пропорционален этой энергии (или длительности ВЧ импульса при постоянной ВЧ мощности).



Рис.10. Интенсивность люминесценции СК (верхний сигнал) и импульсы ВЧ возбуждения (нижний сигнал, инвертирован). Чистый О₂, давление 12 Торр. Путь регистрации №1. Длительность импульсов ВЧ возбуждения – 1.0 мс. Развертка 2.5 мс/дел. Рабочая длина волны монохроматора λ=(1270+X) нм. X=0 (а), 11 (б), 22 (в), 33 (г), 44 (д). X= -11 (е), -22 (ж), -33 (з), -44 (и).

Для того, чтобы быть уверенным, что регистрируемый сигнал действительно является сигналом люминесценции СК, был измерен контур спектральной линии путем перестройки рабочей длины волны монохроматора. Сигналы люминесценции (**Puc.10**), соответствующие пятой миллисекунде послесвечения (после импульса ВЧ накачки), были выбраны для построения профиля спектральной линии (**Puc.11**) для того, чтобы избежать влияния излучения, исходящего из зоны разряда во время действия импульса ВЧ накачки (см., например, **Puc.10 г,** д).



Рис.11.

Профиль спектральной линии люминесценции СК на пятой миллисекунде послесвечения (после импульса ВЧ возбуждения).

Следующая серия экспериментов (**Рис.12**) была выполнена для чистого O₂, прокачиваемого через зону ВЧ возбуждения с разными скоростями. При этом сигналы люминесценции СК регистрировались из разных зон вниз по потоку газа по отношению к зоне ВЧ разряда (см. **Рис.7**). Условия этих экспериментов были одинаковы: давление газа в разрядном канале 12 Торр, электродная система охлаждается водой комнатной температуры, частота повторения импульсов ВЧ возбуждения 100 Гц, длительность ВЧ импульсов 1 мс, импульсная мощность ВЧ генератора 620 Вт.

Из Рис.12, можно оценить реальную скорость газового потока, сравнив осциллограммы, расположенные в вертикальных колонках, соответствующих постоянной скорости (например, $V=V_{max}$ или $V=V_{max}/2$). Идентифицируя временное положение максимума сигнала люминесценции СК с реальной геометрией наблюдения, V_{max} в условиях наших экспериментов составила 35-40 м/с.

В этих же условиях были получены опорные сигналы люминесценции СК при V=0 по пути наблюдения №1 для дальнейшей калибровки измерительной системы (главным образом, для оценки выхода СК) по результатам наших предыдущих исследований (*Ionin, 2007a*).



Рис.12. Сигналы люминесценции СК для различных скоростей потока чистого O₂ (от V=V_{max} до V=0) полученные из различных зон вниз по потоку газа (пути регистрации №1, №2 и №3) и импульсы ВЧ возбуждения (нижний сигнал, инвертирован). Горизонтальная развертка 2.5 мс/дел, вертикальная развертка - одинаковая. Отрицательный выброс в некоторых сигналах люминесценции – следствие электромагнитных наводок во время импульса ВЧ возбуждения.

4. РАСЧЕТ (ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ РЕЖИМ).

Импульсно-периодический режим работы ВЧ разряда в кислороде предоставляет новые возможности для управления генерацией СК. В случае импульсно-периодического режима работы ВЧ разряда, порция газа, пролетающая через зону разряда, испытывает повторяющееся воздействие разряда. Число воздействующих импульсов зависит от частоты повторения, а средняя мощность определяется амплитудой мощности разряда и скважностью 12 ВЧ импульсов. Чтобы описать эту систему требуется дальнейшая модификация численной модели для теоретического прогнозирования эффективности использования емкостного ВЧ разряда щелевого типа с прокачкой газовой смеси для наработки СК.

Разработанная нами ранее кинетическая модель (*Ionin, 2007b*), включающая описание самостоятельного и электроионизационного разрядов, и кинетику с участием молекул NO и NO₂ (*Ionin, 2009b*) была модернизирована для исследования импульсно-периодического проточного ВЧ разряда.

При моделировании используется приближение газовой пробки эволюция компонент плазмы при движении по каналу рассчитывалась как их эволюция во времени. В расчетах скорость движения газа считалась равной 30 м/с.

Сопоставление частот релаксации импульса и энергии электронов с частотой ВЧ поля, представленное на **Рис.13**, показало, что в условиях эксперимента (заштрихованная область) частота релаксации энергии электронов немного превосходит частоту возбуждающего поля. В таких условиях, как показано в (Дятко, 1985, 1998) можно использовать приближение постоянного поля.



Рис.13.

Зависимость частоты релаксации импульса электронов (ν_m) и их энергии (ν_u) от Е/N для 12 Торр кислорода. Штрих-пунктир – частота электрического поля (ω). Заштрихованная область – расчетные пределы изменения Е/N в разряде.



Рис.14. Зависимость коэффициента теплопроводности молекулярного кислорода от температуры газа. Треугольники – данные *(Григорьев, 1991)*, линия – используемая интерполяция.

В эксперименте расстояние между алюминиевыми электродами *d*, охлаждаемыми водой, составляет величину 0,3 см, а время пролета газа при максимальной скорости прокачки газа 30 м/с - одну миллисекунду. При таких условиях теплопроводность газа будет заметно уменьшать его нагрев в разряде. Для учета этого процесса в уравнение для поступательной температуры газа был добавлен член, учитывающий уход тепла через электроды:

$$C_{V}kN\frac{dT}{dt} = P_{HEATING} + kT\frac{dN}{dt} - \frac{\lambda}{\Lambda^{2}}(T - T_{0}), \qquad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; C_V – теплоемкость при постоянном объеме; κ – постоянная Больцмана; N –плотность газа; $\Lambda^2 = \left(\frac{d}{\pi}\right)^2$; $P_{HEATING}$ – объемная мощность нагрева газа в разряде и после его окончания. Второй член в правой части учитывает расширение газа, а третий – его теплопроводность. Температура электродов считалась постоянной и равной температуре воды T_0 охлаждающей электроды. В расчетах использовалась линейная интерполяция на **Рис.14**.

Характерное звуковое время, оцененное как $\tau_s = \frac{a}{2u_s}$ (*a* – ширина зоны разряда вниз по потоку), составляет 50 мкс. На малых временах меньше τ_s использовалось приближение постоянной плотности газа, а на больших – 14

приближение постоянного давления. В промежуточной области времен для плотности газа использовалось интерполяционная формула:

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau_s}} + N_0 \frac{T_{t=0}}{T} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_s}})$$
⁽²⁾

где N_0 и $T_{t=0}$ – начальные плотность и температура газа. В кинетические уравнения для компонент плазмы были добавлены соответствующие члены, учитывающие расширение газа. Такой подход использовался нами ранее (*Акишев*, 1982).

В модели использовалась электрическая цепь, состоящая из источника напряжения и балластного сопротивления. Их величины подбирались из условия близости расчетной мощности разряда к экспериментальной.

На **Рис.15** показана эволюция поступательной температуры при различных предположениях о теплопередачи на стенки канала. Кривая 1 учитывает теплопроводность газа, при этом температура стенки канала фиксирована. В зоне разряда (3 см вниз по потоку) электроды представляют собой алюминиевые пластины, охлаждаемые водой (коэффициент теплопроводности алюминия 2.37 Вт/(см·К)). Далее вниз по потоку материал стенок канала – тефлон. Коэффициент теплопроводности его значительно меньше и составляет 2.3·10⁻³ Вт/(см·К). Кривая 2 – результат моделирования в пренебрежении ухода тепла через тефлоновые стенки. Кривая 3 – расчет без учета теплопроводности газа. Учет теплоотвода через стенки канала значительно уменьшает температуру газа.



Рис.15.

Зависимость поступательной температуры газа от времени. Чистый О₂, P = 12 Торр. 1 – учитывается теплопроводность газа; 2 – учитывается теплопроводность газа только в зоне разряда; 3 – без учета теплопроводности. На **Рис.16-17** приведены разрядные характеристики: приведенное электрическое поле, плотность тока и удельная мощность разряда в зависимости от времени. На **Рис.16** - линейный масштаб, а на **Рис.17** – логарифмический. Заметим, что характеристики разряда слабо зависят от предположений о тепловых режимах работы. Средняя мощность разряда в расчетах - 21.1 Вт/см³, что близко к экспериментальной величине 23.0 Вт/см³.

Из **Рис.16-17** видно, что на малых временах (около 1 мкс) приведенное электрическое поле, после пробоя разрядного промежутка, устанавливается на уровне 130 Td. После этого происходит его спад до значений 60-50 Td, которое слабо меняется на большей части длительности импульса BЧ генератора (1 мс). Спад поля связан с процессами отлипания электронов от О⁻ при столкновении с атомарным кислородом и электронно-возбужденными молекулами кислорода в синглетных состояниях:

$$O + O -> O_2 + e,$$
 (3)

$$O + O_2(a^{\scriptscriptstyle 1}\Delta_g) \rightarrow O_3 + e, \tag{4}$$

$$O + O_2(b^1 \Sigma_g^+) \to O + O_2 + e,$$
 (5)

величины констант этих процессов равны 1.9·10⁻¹⁰, 3.0·10⁻¹⁰ и 7.0·10⁻¹⁰ см³/с, соответственно.



Рис.16. Зависимость E/N, плотности тока и удельной мощности разряда от времени для кислорода. P = 12 Торр, начальная температура $T_{t=0}=300$ К, учитывается теплопроводность газа.



Изменение плотности ряда компонент плазмы приведено на **Рис.18**. Видно, что концентрация атомов О немного больше концентрации синглетного кислорода $O_2(a^1\Delta_g)$.



Рис.19.

Зависимость плотности синглетов и атомарного кислорода от времени. Y = 5.5% при 1 мс, Y = 6.8% при 2.3 мс. Условия соответствуют **Рис.16.**



Рис.20.

Зависимость плотности электронов и отрицательных ионов атомарного кислорода от времени. Условия соответствуют Рис.16.

На Рис.19 представлено поведение концентраций двух синглетов и атомарного кислорода. В момент окончания импульса ВЧ разряда выход синглетного кислорода $O_2(a^1\Delta_g)$ составляет 5.5%. Максимум его выхода наблюдается в послесвечении в момент времени 2.3 мс и составляет 6.8%.

Концентрация электронов, как видно из **Рис.20**, в момент прекращения ВЧ импульса увеличивается в 1.8 раз. Резкое увеличение концентрации электронов в момент прекращения импульса ВЧ возбуждения связано с падением температуры электронов в отсутствии электрического поля, что влечет уменьшение частоты диссоциативного прилипания электронов к молекулам кислорода. Образование электронов в это время происходит за счет процессов отлипания электронов (3)-(5) от отрицательного иона О. Это иллюстрирует **Рис.20**.

5. ЭКСПЕРИМЕНТ (НЕПРЕРЫВНЫЙ РЕЖИМ).

В этих экспериментах исследовалось влияние на наработку СК таких параметров, как давление и состав газовой смеси, скорость потока газа, частота модуляции (низкочастотная) ВЧ мощности и мощность, вкладываемая в ВЧ разряд. Регистрация люминесценции проводилась с помощью оптической Рис.7. схемы, представленной на Диагностируемая область потока располагалась на расстоянии 70 мм от центра разряда (оптический путь №3 на Рис.7). В большинстве описываемых ниже экспериментов ВЧ разряд действовал в непрерывном режиме (рабочая частота генератора 60 МГц), поэтому перед щелью монохроматора располагался оптический модулятор с изменяемой частотой модуляции. В экспериментах частота модуляции составляла ~50 Гц. Чтобы убедиться, что регистрируемый сигнал обусловлен люминесценцией СК, для каждой серии экспериментов проводилось контрольное измерение спектрального распределения интенсивности регистрируемой люминесценции. Наблюдаемое спектральное распределение было идентично представленному на Рис.11.

На Рис.21-23 показаны осциллограммы люминесценции СК (промодулированные с частотой ~50 Гц), полученные в чистом кислороде для различных давлений при разных мощностях непрерывного ВЧ разряда. Скорость потока газа в этих экспериментах была максимальной (V=V_{max}) и составляла ~30 м/с. Увеличение вкладываемой в ВЧ разряд мощности приводило к возрастанию интенсивности люминесценции.



Рис.21. Интенсивность люминесценции СК. Чистый О₂. P=7.5 Торр. Непрерывная ВЧ мощность 100 Вт (а), 200 Вт (б), 300 Вт (в), 400 Вт (г). Развертка 2.5 мс/дел.



Рис.22. Интенсивность люминесценции СК. Чистый О₂. P=15 Торр. Непрерывная ВЧ мощность 100 Вт (а), 200 Вт (б), 300 Вт (в), 400 Вт (г), 500 Вт (д). Развертка 2.5 мс/дел.



Рис.23. Интенсивность люминесценции СК. Чистый О₂. Р=30 Торр. Непрерывная ВЧ мощность 100 Вт (а), 200 Вт (б), 300 Вт (в), 500 Вт (г), 700 Вт (д). Развертка 2.5 мс/дел.

Для удобства анализа полученных результатов, были построены графики, показанные на **Рис.24-27**. На этих графиках по оси абсцисс отложена либо мощность P_{in}, вкладываемая в ВЧ разряд, либо удельный энерговклад. (В условиях эксперимента развертку по потоку газа можно рассматривать как развертку по времени с возбуждением газа моноимпульсным разрядом. Длительность разряда в этом случае определяется временем пролета газа через разрядную область. В этих экспериментах это время составляло ~1 мс). По оси ординат откладывалась регистрируемая интенсивность люминесценции СК (пропорциональна концентрации СК), либо приведенная интенсивность, т.е. интенсивность, нормированная на парциальное давление кислорода (аналог выходу СК).



Рис.24. Зависимость интенсивности люминесценции СК (концентрации СК) от вкладываемой мощности Р_{in} для давлений 7.5, 15 и 30 Торр. Чистый О₂.

Рис.25. Зависимость интенсивности люминесценции СК (концентрации СК) от удельного энерговклада для давлений 7.5, 15 и 30 Торр. Чистый О₂.



Увеличение давления кислорода приводило к значительному возрастанию концентрации СК (интенсивности люминесценции СК). Особенно хорошо это видно на **Puc.25**, где при большем давлении концентрация СК была значительно выше, даже при меньших значениях удельного энерговклада. С точки зрения выхода СК, наблюдалась другая ситуация. При одинаковой мощности, вкладываемой в ВЧ разряд, выход СК (приведенная интенсивность

люминесценции) увеличивался с уменьшением давления (см. **Рис.26**). Кроме того, для данных экспериментальных условий (скорость прокачки, диапазон давлений, время пролета от разрядной до диагностируемой области и др.) выход СК в большей степени зависел от величины удельного энерговклада и при этом практически не зависел от давления (**Рис.27**). Поскольку, при низком давлении было проще обеспечить большие значения удельного энерговклада, наибольшее значение выхода СК в этих экспериментах было получено при давлении 7.5 Торр.

Аналогичная серия экспериментов была проведена при меньшей скорости потока газа (V=V_{max}/2=15 м/с). Наблюдаемые осциллограммы люминесценции СК представлены на **Рис.28-30**.



Рис.28. Интенсивность люминесценции СК. Чистый О₂. P=7.5 Торр, непрерывная ВЧ мощность 100 Вт (а), 200 Вт (б), 300 Вт (в), 400 Вт (г). Развертка 2.5 мс/дел.



Рис.29. Интенсивность люминесценции СК. Чистый О₂. P=15 Торр, непрерывная ВЧ мощность 100 Вт (а), 200 Вт (б), 300 Вт (в), 400 Вт (г), 500 Вт (д). Развертка 2.5 мс/дел.



Рис.30. Интенсивность люминесценции СК. Чистый О₂. Р=30 Торр, непрерывная ВЧ мощность 200 Вт (а), 400 Вт (б), 600 Вт (в). Развертка 2.5 мс/дел.

По сравнению с предыдущей серией экспериментов (при скорости газового потока V=V_{max}, **Рис.21-23**) наибольшее значение концентрации СК, полученное в этих экспериментах при V=V_{max}/2 и давлении чистого O₂ 7.5 Торр возросло почти в два раза, тогда как при давлении 30 Торр увеличение концентрации СК составило около 10-15% (см., например Рис.24, 25 и Рис.31, 32). Следует отметить, что в этой серии (с V=V_{max}/2), по сравнению с предыдущей, в два раза увеличилось время пролета газа через разрядную область (увеличился удельный энерговклад), при этом время пролета от разряда диагностируемой области также увеличилось (увеличилась ДО роль релаксационных процессов). При увеличении давления скорость трехчастичных СК: $O_2(a^{\dagger}\Delta_{\sigma})+O_2+O\rightarrow O_2+O_2+O)$ реакция тушения реакций (например, существенно возрастает, что может приводить к снижению регистрируемой концентрации СК при повышении давления. Это хорошо заметно на Рис.34, где показана зависимость приведенной интенсивности люминесценции СК (выхода СК) от удельного энерговклада при разных давлениях. В отличии от Рис.27, где экспериментальные точки ложатся на одну кривую, на Рис.34 выход СК при давлении 7.5 Торр выше, чем при более высоких давлениях во всем диапазоне энерговкладов.





Рис.32. Зависимость интенсивности люминесценции СК (концентрации СК) от удельного энерговклада для давлений 7.5, 15 и 30 Торр. Чистый О₂. V=V_{max}/2.



Следует отметить, что для всех зависимостей, показанных на **Рис.34** (для всех давлений), при увеличении удельного энерговклада наблюдается уменьшение угла наклона кривой. Т.е. наблюдается процесс насыщения выхода СК при увеличении энерговклада. Также следует отметить, что максимальное значение выхода СК наблюдалось при давлении 7.5 Торр и было почти в два раза больше, чем в предыдущей серии экспериментов (см., например, **Рис.27** и Рис.**34**.).



Рис.34. Зависимость приведенной интенсивности люминесценции СК (выхода СК) от удельного энерговклада для давлений 7.5, 15 и 30 Торр. Чистый О₂. V=V_{max}/2.

В экспериментах также исследовалась наработка СК в гелий-содержащих газовых смесях. На **Рис.35, 36** представлены зависимости концентрации СК от вкладываемой в ВЧ разряд мощности и от удельного энерговклада (на полное давление смеси). Скорость потока газа составляла ~30 м/с. Парциальное давление кислорода было постоянным и составляло 7.5 Торр. Таким образом, в этих экспериментах выход СК, определяемый как отношение интенсивности люминесценции СК к парциальному давлению кислорода в газовой смеси, был пропорционален интенсивности.



Рис.35.

Зависимость интенсивности люминесценции СК (концентрации СК) от вкладываемой мощности Р_{in} для различных газовых смесей: О₂:He=1:0, 1:1, 1:2; V=V_{max}. Парциальное давление кислорода 7.5 Торр.



Рис.36.

Зависимость интенсивности люминесценции СК (концентрации СК) от удельного энерговклада для различных газовых смесей: O₂:He=1:0, 1:1, 1:2; V=V_{max}. парциальное давление кислорода 7.5 Торр.

Ранее А. П. Напартовичем высказывалась идея о возращении части потока с выхода разряда на его вход, которая была реализована в работе (*Hill, 2007*). Поскольку в разряде нарабатывается СК, который эффективно разрушает отрицательные ионы, его введение в поток улучшает эффективность электрического разряда. С этой точки зрения, возбуждение газа не одним, а несколькими импульсами может привести к наработке большего количества СК.

При скорости газового потока 15 м/с (время пролета газа через разрядную область ~2 мс) было исследовано влияние частоты модуляции ВЧ мощности на наработку СК при неизменной средней вкладываемой мощности. На **Рис.37** показаны осциллограммы, полученные в этом эксперименте. Для справки, на **Рис.37а** показана люминесценция СК, наработанного в непрерывном ВЧ разряде.



Рис.37. Интенсивность люминесценции СК. Чистый О₂, P=15 Торр, средняя ВЧ мощность 180 Вт. Частота модуляции ВЧ мощности (длительность импульса – 20% от периода): без модуляции (а), 1 кГц (б), 5 кГц (в), 7 кГц (г), 10 кГц (д). Развертка 2.5 мс/дел.

Следует отметить, что на **Рис.37а** непрерывная ВЧ мощность составляла 180 Вт, тогда как на **Рис.376-д** импульсная мощность ВЧ возбуждения составляла 900 Вт, при средней – 180 Вт. Уменьшение частоты модуляции ВЧ мощности от 10 кГц до 1 кГц (**Рис.37д-б**) приводило к увеличению концентрации СК почти на 50%. Переход от модуляции с частотой 1 кГц к непрерывному ВЧ разряду с такой же средней мощностью приводил к увеличению концентрации СК еще на 25-30%. Таким образом, при одинаковой средней мощности, вкладываемой в ВЧ разряд, наиболее эффективно СК нарабатывается в непрерывном ВЧ разряде.

6. РАСЧЕТ (НЕПРЕРЫВНЫЙ РЕЖИМ).

Разработанная нами ранее модель генератора СК с использованием щелевого ВЧ разряда применена для расчета влияния мощности разряда, давления газовой смеси и скорости её прокачки на наработку СК. Приведенные результаты численного моделирования ЭТОМ разделе относятся В К стационарному ВЧ разряду с частотой возбуждающего поля 60 МГц, при диапазоне мощности генератора 50 – 800 Вт. Расчёты проводились для чистого кислорода давлением 7.5, 15 и 30 Торр со скоростью прокачки через зону разряда 15 и 30 м/с. Зона разряда представляла собой параллеленинед с расстоянием между электродами 3 мм, размерами по и перпендикулярно потоку 3 и 30 см, соответственно. Таким образом, объем зоны возбуждения составлял 27 см³. После выхода порции газа из зоны разряда преобладали релаксационные процессы в плазме. Расчёты выполнялись до 3 и 6 мс, что соответствовало расстоянию вниз по потоку 9 см при скоростях прокачки 30 и 15 м/с, соответственно.

На **Рис.38–43** приведены результаты расчётов для скорости прокачки газа 30 м/с. На **Рис.38** показана зависимость концентрации СК в моменты времени 1.67 и 2.83 мс, отсчитываемые от начала разряда, в зависимости от мощности ВЧ разряда для трех значений давления кислорода.



Рис.38.

Зависимость концентрации СК от мощности разряда в моменты времени 1.67 мс и 2.83 мс (от начала разряда) для давлений 7.5, 15 и 30 Торр.

Рис.39.

Зависимость концентрации СК от энергии разряда в моменты времени 1.67 мс и 2.83 мс (от начала разряда) для давлений 7.5, 15 и 30 Торр.

Концентрация СК в зависимости от удельной энергии, вложенной в газ, показана на **Рис.39** в эти же моменты времени 1.67 и 2.83 мс. Пересечение кривых для времен наблюдения 1.67 мс и 2.83 мс при давлениях 7.5 Торр и 15 Торр объясняется тем, что концентрация СК продолжает нарастать после выхода порции газа из разряда вследствие релаксации из более высоких электронных состояний молекулы O_2 в состояние $a^1\Delta_g$. При мощностях возбуждения меньше некоторой величины максимум концентрации СК попадает в интервал времени между 1.67 и 2.83 мс. При увеличении давления рабочей смеси до 30 Торр максимум в концентрации СК смещается ближе к зоне разряда и кривые, соответствующие временам наблюдения 1.67 мс и 2.83 мс, не пересекаются.

Заметим, что в используемой модели не учитывались приэлектродные слои, образующиеся в емкостном ВЧ разряде. В этих слоях мощность разряда тратится преимущественно на нагрев газа, что уменьшает наработку СК. Как показано в работах (*Старостин, 2002; Ионин, 2005; Proshina., 2006*), толщина слоев растет с уменьшением давления газа. Учет этого эффекта может приводить к уменьшению концентрации СК с уменьшением давления газа. Для количественного учета этого эффекта необходим переход на одномерную модель ВЧ разряда.





Рис.41.

Зависимость эффективности образования СК от мощности разряда в моменты времени 1.67 мс и 2.83 мс (от начала разряда) для давлений 7.5, 15 и 30 Торр. На **Рис.40** и **Рис.41** приведены зависимости выхода СК и эффективности его образования от мощности разряда. Выход СК растет с уменьшением давления молекулярного кислорода, а эффективность его образования меняется незначительно с изменением мощности ВЧ разряда и давления, что связано с нечувствительностью величины приведенного электрического поля к изменениям мощности разряда и давления.



Рис.42.

Зависимость эффективности образования СК от его выхода в моменты времени 1.67 мс и 2.83 мс (от начала разряда) для давлений 7.5, 15 и 30 Торр.

Рис.43.

Зависимость выхода СК от эффективности его образования в моменты времени 1.67 мс и 2.83 мс (от начала разряда) для давлений 7.5, 15 и 30 Торр.

Электроразрядные генераторы СК, в основном, характеризуются двумя параметрами: выходом синглетного кислорода И эффективностью его зависимости образования. Ha Рис.42 И **43** приведены эффективности образования СК от его выхода и обратные зависимости. В исследуемых условиях при давлении 15 Торр расчетный выход СК может достигать 8% при эффективности 12%.

На **Рис.44–49** приведены результаты расчётов для уменьшенной в два раза (по сравнению с предыдущей) скорости прокачки в 15 м/с. Как видно, уменьшение скорости прокачки приводит к насыщению нарабатываемой концентрации СК с увеличением мощности ВЧ разряда.



Этот эффект объясняется ростом в два раза времени пребывания порции газа в зоне разряда и, соответственно, величины удельного энерговклада. При давлении 15 Торр выход растет до 10 % при эффективности 8%.



Рис.46.

Зависимость выхода СК от мощности разряда в моменты времени 3.43 мс и 5.67 мс (от начала разряда) для давлений 7.5, 15 и 30 Торр.



Эффективность образования СК начинает падать с увеличением его выхода. При этом на больших расстояниях от зоны разряда снижение эффективности и выхода СК становится более заметным (см. **Рис.48**). Это связано в основном с релаксацией СК на атомах кислорода в тройных столкновениях (*Rakhimova, 2005*). Ситуация с релаксацией СК на больших временах может быть заметно исправлена путем добавления малых добавок NO или NO₂, которые эффективно устраняют атомарный кислород (*Ionin, 2009*).



Рис.48. Зависимость эффективности образования СК от его выхода в моменты времени 3.43 мс и 5.67 мс (от начала разряда) для давлений 7.5, 15 и 30 Торр.

Рис.49. Зависимость выхода СК от эффективности его образования в моменты времени 3.43 мс и 5.67 мс (от начала разряда) для давлений 7.5, 15 и 30 Торр.

Эффективность наработки СК начинает также падать и при уменьшении мощности ВЧ разряда в области (200 – 300) Вт (см. Рис.41 и Рис.47). Это объясняется ростом приведенного электрического поля при уменьшении мощности ВЧ разряда. Динамика изменения приведенного электрического поля E/N во времени показана на **Рис.50**. Хотя параметр E/N падает со временем, он остаётся всё время существенно выше величины, обеспечивающий максимальную эффективность возбуждения состояния O₂(a¹Δ_g), составляющей всего около 12 Тд (Ionin, 2007b). Пробой разрядного промежутка происходит за достаточно короткие времена порядка 1 мкс. Величина Е/N на этой стадии определяется ИЗ равенства скоростей прямой разряда ионизации И 34

диссоциативного прилипания электронов к молекулам O_2 (точка 1 на **Рис.50** и столбец 1 в **Табл. 1**). Дальше концентрация отрицательных ионов накапливается, и начинают сказываться процессы отлипания электронов при столкновениях отрицательных ионов с атомами и возбужденными молекулами O_2 . Концентрация электронов на этой стадии определяется балансом процессов прилипания и отлипания (точки 2 и 3 на **Рис.50** и второй и третий столбцы в **Табл. 1**).



Fig.50. Зависимость приведенного электрического поля в плазме разряда в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабе времени. Точками указаны разные моменты времени, для которых приведен баланс электронов в **Табл. 1**. При переходе к области меньших давлений (при одной и той же мощности возбуждения) вклад в пересчете на молекулу O₂ растет, и процессы отлипания начинают преобладать на меньших временах (**Рис.50**).

Таблица 1.

Вклад различных процессов в образование и гибель электронов в моменты времени 1 мкс, 300 мкс и 2 мс от начала разряда. Эти моменты времени отмечены на **Рис.50.** P = 30 Topp, P_{in} = 200 BT, u = 15 м/с.

#	Процесс	1 – 1 мкс	2-300 мкс	3-2 мс
1	$O_2 + e -> O + O$	-100%	-100%	-100%
2	$O_2(a^1\Delta_g) + e \rightarrow O + O$			-6%
3	$O_2(b^1\Sigma_g^+) + e -> O + O$			-9.1%
4	$O_2 + e -> O_2^+ + e + e$	+99%	+9.3%	
5	$O' + O -> O_2 + e$		+21%	+30%
6	$O' + O_2(a^1 \Delta_g) -> O + O_2 + e$		+10%	+41%
7	$O + O_2(b^1\Sigma_g^+) -> O + O_2 + e$		+43%	+43%
8	$O_2 + O -> O_3 + e$		+8.5%	
9	$O_2 + O_2(b^1 \Sigma_g^+) -> O_3 + e$		+5.6%	

Представляет практический интерес исследование импульснопериодического режима ВЧ разряда в кислороде для получения СК. В импульсно-периодическом разряде порция газа, пролетающая через зону испытывает повторяющееся воздействие разряда. Число разряда, воздействующих импульсов зависит от частоты повторения, а средняя мощность определяется амплитудой мощности разряда и скважностью ВЧ импульсов. Нами проведено моделирование для давления кислорода 15 Торр, скорости прокачки газа 30 м/с, заполнении ВЧ импульсами 20%, частот повторения 1, 2, 4, 6, 8 и 10 кГц и амплитуды мощности ВЧ импульса 1100 Вт. Средняя мощность составляла 220 Вт.

разряда. В Заметим, В эксперименте контролировалась мощность расчетной модели задавались величина напряжения И балластного сопротивления, которые были подобраны из условия равенства расчетной и экспериментальной мощностей разряда. Выбранное напряжение и балластное сопротивление обеспечивали одну и ту же среднюю мощность возбуждения в диапазоне частот повторения ВЧ импульсов 1 – 10 кГц с точностью не хуже 5%.



Рис.51 приведено изменение во времени (вдоль по потоку) Ha концентрации СК для различных частот повторения ВЧ импульса, а Рис.52 показывает зависимость величины выхода СК и эффективность его образования от частоты следования ВЧ импульсов при постоянных их амплитуде и скважности. Величина выхода СК и его эффективность образования практически не зависят от частоты повторения ВЧ импульсов и немного меньше значений этих величин, соответствующих непрерывному режиму возбуждения при мощности возбуждения, равной средней мощности возбуждения для импульсно-периодического режима. Величины выхода СК и его эффективность для непрерывного режима показаны незаполненными кружками. Следует отметить, что в эксперименте наблюдался более существенный рост выхода СК при переходе к непрерывному режиму.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Экспериментально исследованы процессы наработки СК в ВЧ разряде в зависимости от состава и давления газовой смеси, от скорости газового потока, от вкладываемой в разряд ВЧ мощности и частоты ее модуляции. Увеличение давления кислорода приводило к существенному росту концентрации СК при одинаковых значениях удельного энерговклада. Выход СК увеличивался при уменьшении давления газа при одинаковой мощности ВЧ возбуждения. Во всех экспериментах наибольшее значение выхода СК было получено при давлении кислорода 7.5 Торр. Двукратное замедление газового потока (до 15 м/с) приводило к примерно двукратному росту концентрации СК при давлении газа 7.5 Торр, в то время как при давлении газа 30 Торр этот рост составил всего 10-15%. При обеих скоростях газового потока (30 м/с и 15 м/с) максимальный выход СК наблюдался при давлении кислорода 7.5 Торр. С увеличением удельного энерговклада для всех давлений газа наблюдалось насыщение выхода СК. Также исследована наработка СК в гелий-содержащих газовых смесях. Разбавление кислорода гелием приводило к заметному (примерно в 2 раза) росту, как концентрации СК, так и его выхода.

Изучено влияние частоты модуляции ВЧ мощности на эффективность наработки СК при одинаковых значениях средней мощности ВЧ возбуждения. Снижение частоты модуляции от 10 кГц до 1 кГц приводило к увеличению концентрации СК примерно на 50%. Переход к непрерывному режиму ВЧ возбуждения приводил к росту концентрации СК еще на 25-30% при той же средней мощности ВЧ возбуждения. Таким образом, для одинаковой средней мощности ВЧ возбуждения, непрерывный режим оказался предпочтительным для наиболее эффективной наработки СК в ВЧ разряде.

Развитая модель была модифицирована для получения возможности расчетов непрерывного и импульсно-периодического ВЧ разрядов как в статических условиях, так и в условиях дозвукового потока газа через зону разряда. При моделировании использовано приближение газовой пробки эволюция компонент плазмы при движении по каналу рассчитывалась как их эволюция во времени. Расчеты показали, что выход СК и эффективность его образования практически не зависят от частоты повторения ВЧ импульсов и немного меньше значений величин, соответствующих непрерывному режиму

38

возбуждения при мощности, равной средней мощности возбуждения для импульсно-периодического режима. В эксперименте наблюдался более существенный рост выхода СК при переходе к непрерывному режиму.

Для того чтобы оценить перспективу построения кислород-йодного лазера с использованием электроразрядного генератора СК необходимо определить абсолютное значение выхода СК - одного из главных параметров возбужденного газового потока. Обычно для этих целей применяются различные процедуры калибровки измерительных систем. В наших экспериментах, опираясь на абсолютные данные по выходу СК (*Ionin , 2006b*), полученные в аналогичной геометрии ВЧ разряда в статических условиях (без протока газа), мы оцениваем максимальное полученное значение выхода СК ~10%. Примерно такую же величину дают численные расчеты для наших экспериментальных условий. Результаты проведенных экспериментов и теоретического моделирования дают основание рассчитывать на получение генерации в кислород-йодном лазере с электроразрядным генератором СК на основе поперечного ВЧ разряда при охлаждении возбужденного газа до температур ~220 К, что весьма реально даже без использования сверхзвукового расширения газового потока.

Работа была поддержана Европейской организацией аэрокосмических исследований (EOARD) и грантом МНТЦ 3835 Р.

8. ЛИТЕРАТУРА

- Акишев Ю.С., Демьянов А.В., Кочетов И.В., Напартович А. П., Пашкин С. В., Пономаренко В. В., Певгов В. Г., Подобедов В. В. // 1982. Теплофизика высоких температур, **20**, с.818.
- Григорьев И.С., Мелихов Е.З. // 1991. Справочник «Физические величины», Энергоатомиздат, Москва.

Дятко Н.А., Кочетов И.В., Напартович А.П. // 1985. Физика плазмы, 11, с.739.

Дятко Н.А., Кочетов И.В., Напартович А.П. // 1998. Физика плазмы, 24, с.90.

- Ионин А.А., Синицын Д.В., Терехов Ю.В., Кочетов И.В., Напартович А.П., Старостин С.А. // 2005. Физика плазмы, **31**, с.786–794.
- Старостин С.А., Боллер К.Дж., Петерс П.Дж.М., Удалов Ю.В., Кочетов И.В., Напартович А.П. // 2002. Физика плазмы, **28**, с.63–70.
- Benavides G. F., Zimmerman J. W., Woodard B. S., Carroll D. L., Verdeyen J. T., Field T. H., Palla A. D., and Solomon W. C.// 2008. Appl. Phys.Lett., **92**, 041116.

- Bohn W., von Buelow H., Dass S., Hager G.D., Ionin A.A., Seleznev L.V., Klimachev Yu.M., Kotkov A.A., McIver J.K., McCord J.E., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Tate R.F. // 2006. *Proc.SPIE*, **6263**, p.626303.
- Braginsky O.V., Kovalev A.S., Lopaev D.V., Mankelevich Yu.A., Proshina O.V., Rakhimova T.V., Rakhimov A.T. and Vasilieva A.N.// 2006. J. Phys. D: Appl. Phys. 39, 5183–5190.
- Braginsky O.V., Kovalev A.S., Lopaev D.V., Proshina O.V., Rakhimova T.V., Rakhimov A.T. and Vasilieva A.N. // 2007. J. Phys. D: Appl.Phys. 40, 6571–6582.
- Braginsky O.V., Kovalev A.S., Lopaev D.V., Proshina O.V., Rakhimova T.V., Rakhimov A.T. and Vasilieva A.N. // 2008. J. Phys. D: Appl. Phys. **41**, 172008.
- Carroll D.L., Verdeyen J.T., King D.M., et al // 2004. Appl.Phys.Lett. 85 1320-1322.
- Carroll D.L., Verdeyen J.T., King D.M., et al // 2005. Appl. Phys. Lett. 86 111104.
- Carroll D.L., Verdeyen J.T., Benavides G.F., Palla A.D., Field T.H.,
 Zimmerman J.W., Woodard B.S., and Solomon W.C. // 2008. 39th
 Plasmadynamics and Lasers Conf. 23 26 June 2008, Seattle, Washington AIAA
 Paper 2008-4008.
- Hall D. and Baker H. // 1995. Proc. SPIE, 2502, 12-19.
- Hill A. E. // 2007. Appl. Phys. Lett. 91, 041116.
- Ionin A.A., Napartovich A.P., Konev Yu.B., Yuryshev N.N., Kochetov I.V., Kurnosov A.K., Shnyrev S.L., Kotkov A.A., Sinitsyn D.V., Seleznev L.V., Ivanov S.V., Vagin N.P., Frolov M.P., Mikheev P.A., Shelepenko A.A., Savinov S.Yu., Klimachev Yu.M., Ionina N.A., Vetoshkin S.A., Kozlov A.Yu., Terekhov Yu.V., Lobarev Yu.V., Podmar'kov Yu.P., Voronov A.I., Kartamysheva O.S., Kupryayev N.V. // 2006a. "Electric discharge and afterglow kinetics for laser mixtures with carbon monoxide, oxygen and iodine". Final Project Technical Report of ISTC Project 2415, Moscow, 2006.
- Ionin A.A., Frolov M.P., Ochkin V.N., Podmar'kov Y.P., Savinov S.Yu., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Vagin N.P., Yuryshev N.N., Kochetov I.V., Napartovich A.P., Rulev O.A. // 2006b. Proc. SPIE, 6101, pp.61011X.
- Ionin A.A., Frolov M.P., Kochetov I.V., Ochkin V.N., Napartovich A.P., Podmar'kov Y.P., Rulev O.A., Savinov S.Yu., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Vagin N.P., Yuryshev N.N. // 2007a. Proc. SPIE, 6346, p.63463I.
- Ionin A.A., Kochetov I.V., Napartovich A.P. and Yuryshev N.N. // 2007b. J. Phys. D: Appl. Phys., 40, pp.R25-R61.
- Ionin A.A., Kozlov A.Yu., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V. // 2009a. Optics Communications, 282, 629–634.

- Ionin A.A., Klimachev Yu.M., Kozlov A.Yu., Kotkov A.A., Kochetov I.V., Napartovich A.P., Rulev O.A., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Vagin N.P., Yuryshev N.N. // 2009b. J. Phys. D: Appl. Phys., 42, p.015201.
- Proshina O.V., Rakhimova T.V., Braginsky O.V., Kovalev A.S., Lopaev D.V., Mankelevich Yu.A., Rakhimov A.T., Vasilieva A.N. // 2006. J. Phys. D: Appl. Phys., **39**, pp.5191–5200.
- Rakhimova T.V., Kovalev A.S., Klopovsky K.S., Lopaev D.V., Mankelevich Yu.A., Vasilieva A.N., Braginsky O.V., Popov N.A., Proshina O.V., Rakhimov A.T. // 2005. 36th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conf. (Toronto, 6–9 June 2005) AIAA Paper 2005-4918.
- Zimmerman J. W., Woodard B. S., Benavides G. F., Carroll D. L., Verdeyen J. T., Palla A. D., and Solomon W. C. // 2008a. Appl. Phys. Lett. **92**, 241115.
- Zimmerman J.W., Woodard B.S., Verdeyen J.T., Carroll D.L., Field T.H., Benavides G.F. and Solomon W.C. // 2008b. J. Phys. D: Appl. Phys. 41, 195209.